

# GIL - 架空线混合输电线路故障特性研究

李浩原<sup>1</sup>, 王文娟<sup>2</sup>, 刘超<sup>1</sup>, 李文津<sup>1</sup>, 曾维雯<sup>1</sup>, 雷雨田<sup>1</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071;

2. 国网四川省电力公司成都市青白江供电分公司, 四川 成都 610300)

**摘要:** 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)具有输电容量大、占地少、维护量小、环境影响小等显著优点, 逐渐成为特殊环境下替代架空线路的首选。针对某两回并行500 kV 架空线路部分改造为GIL的混合输电线路系统, 根据GIL和架空线的结构和电气参数, 在PSCAD中建立GIL-架空线混合输电线路模型, 并在线路不同位置设置短路故障进行仿真计算, 研究其故障相电压和电流特性与改造前的差异, 结合仿真结果提出线路改造建议。

**关键词:** GIL; 架空线路; 故障特性

**中图分类号:** TM755 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)03-0044-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20210309

## Study on Fault Characteristics of Hybrid Transmission Line with GIL and Overhead Line

Li Haoyuan<sup>1</sup>, Wang Wenjuan<sup>2</sup>, Liu Chao<sup>1</sup>, Li Wenjin<sup>1</sup>, Zeng Weiwen<sup>1</sup>, Lei Yutian<sup>1</sup>

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China; 2. State Grid Chengdu Qingbaijiang Electric Power Supply Branch, Chengdu 610300, Sichuan, China)

**Abstract:** Gas-insulated transmission line (GIL) has many advantages, such as large transmission capacity, small occupation of land, small maintenance and small environmental impact, and has gradually become the first choice to replace overhead lines in special environments. Aiming at a hybrid transmission line system with two 500 kV overhead lines partially reformed to GIL, a hybrid transmission line model with GIL and overhead is established in PSCAD based on the structure and electrical parameters of GIL and overhead line, and short-circuit faults are set up at different positions of the line for simulation, so as to study the differences between fault characteristics. And suggestions for line reconstruction are proposed based on the simulation results.

**Key words:** gas-insulated transmission line (GIL); overhead line; fault characteristics

## 0 引言

随着社会经济的发展, 城市用电量越来越大, 而大规模发电装置往往远离负荷中心, 需要长距离的电能输送。为了降低电能传输中的损耗, 一般会采用超高压或特高压输电线路进行大负荷电能的输送<sup>[1]</sup>。

架空输电线路是目前最常用的输电方式, 一般多用于输电走廊宽裕的地区, 而对于输电走廊紧张

的城市, 其适用性受到限制。而气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)具有输电容量大、占地少、维护量小、环境影响小等显著优点, 逐渐成为特殊环境下替代架空线路的首选<sup>[2-3]</sup>。GIL是一种采用SF<sub>6</sub>气体或SF<sub>6</sub>与N<sub>2</sub>混合气体绝缘<sup>[4-5]</sup>、金属外壳与导体同轴布置的高电压、大电流电力传输设备。作为当今世界的先进输电技术, GIL提供了一个紧凑、可靠、经济的电力输送方式<sup>[6-7]</sup>。GIL采用全封闭式结构, 管道内部的绝缘

气体间隙和绝缘子(支柱绝缘子和盆式绝缘子)的绝缘性能不受外界环境中各类污秽、雨雪和覆冰的影响,不存在发生污闪和覆冰闪络的可能,可以替代高寒、多雨雪、重污秽地区的架空输电线路,相对于架空线来说 GIL 故障率更低,运行更为安全可靠<sup>[8-10]</sup>。

由于 GIL 的上述优良性能,使其成为复杂地形或走廊紧张地区高压大容量输电的首选方案。某工程拟建设地下综合管廊,将两回 500 kV 架空线路部分改入综合管廊,采用两回 500 kV GIL 敷设于地下管廊中。改造后,原纯架空输电线路变成了 GIL-架空线混合线路。由于架空线与 GIL 的线路参数存在明显的差异,由此可能造成改造后的混合线路阻抗发生变化,继而引起线路的故障特性发生变化,因此有必要对此进行研究,以保障改造后输电系统的安全运行。

文献[1]根据单相 GIL 的几何结构研究了单相 GIL 金属外壳和内导体的电流和磁场分布特征,讨论了 GIL 的磁场分布对 GIL 电气参数的影响。文献[11]研究了水平对称三相 GIL 的磁场分布特性,给出了水平对称三相 GIL 磁场分布和阻抗的数值计算结果。文献[12-13]考虑输电线路的集肤效应和邻近效应对 GIL 线路参数的影响,给出了考虑集肤效应和邻近效应的 GIL 模型。文献[14]根据 GIL 的电气参数特征,采用无损贝瑞隆模型建立了 GIL-架空线混联线路系统模型。上述文献研究了 GIL 的电气参数,但均未考虑纯架空输电线路部分改造为 GIL 后系统故障特性的变化。因此,拟针对该 500 kV GIL 与架空线混合线路工程,建立 PSCAD 仿真模型,研究该混合线路的故障特性,并将其与改造前的纯架空输电线路进行对比,得出二者故障特性的差异,对架空线进行 GIL 改造提出建议。

## 1 GIL 结构和接地方式

GIL 的几何结构如图 1 所示,内部芯线为传输电能的载体,采用高电导率的铝合金材质,考虑交流电的集肤效应,芯线内部设计为中空。金属外壳和芯线为铝合金材质,芯线与金属外壳同轴布置,金属外壳和芯线之间充有高压绝缘气体 SF<sub>6</sub>。

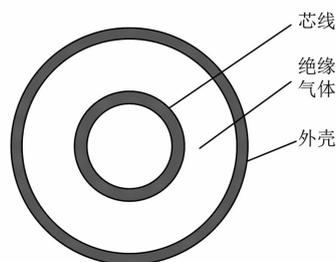


图 1 GIL 横截面结构

GIL 目前常用的敷设方式主要有架空敷设、直埋敷设和隧道敷设 3 种。不论何种敷设方式,为实现对芯线的电磁屏蔽和保障故障时人身和设备的安全,GIL 的金属外壳会进行接地处理,所研究的工程中 GIL 线路的长度为 6 km,GIL 沿线装设接地铜排,每隔 30 m 用接引线将外壳接到接地铜排上,然后将接地铜排的两端接地。

## 2 GIL-架空线混合线路仿真建模

所研究的架空线改造工程改造后的输电线路系统如图 2 所示。图 2 中,终端站 1 侧的架空线长度为 15 km,终端站 2 侧的架空线长度为 9.5 km,GIL 长度为 6 km。GIL 的制作工艺、敷设环境、几何架构等与架空线有显著区别,无法采用常规架空线模型进行等效和模拟。因此,首先针对 GIL 输电线路进行建模,以实现 GIL-架空线混合线路的精确电磁暂态仿真建模,进而对 GIL-架空混合线路的故障特性进行仿真与分析。

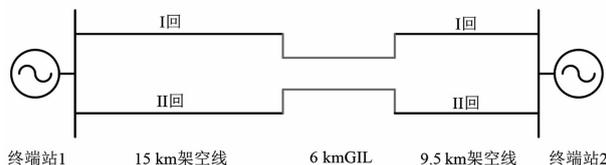


图 2 500 kV GIL-架空混合线路系统

采用常用的电磁暂态仿真计算软件 PSCAD/EMTDC 进行 GIL-架空线混合线路的建模。

### 1) GIL 仿真模型

采用 PSCAD/EMTDC 中的 Cable 模型进行 GIL 的模拟,Cable 模型可以在其 Layer Configuration 中设置为 C1|I1|C2(C 表示导体,I 表示绝缘层),与 GIL 对应的结构即为:金属芯线|气体绝缘层|金属外壳,同时该模型的芯线可设置为中空的形式,与 GIL 的芯线结构完全一致。各材料层通过电气参数

设置来体现其电气特性。

图 3 为 PSCAD 中 Cable 模型的界面,根据表 1 中参数进行模型的设置,该模型表示的参数为中空芯线内半径 0.075 m、外半径 0.090 m,绝缘气体层厚度 0.187 m,金属外壳内半径 0.277 m,金属外壳外半径 0.285 m。

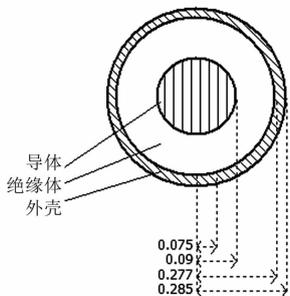


图 3 PSCAD 中 Cable 模型界面

## 2) GIL - 架空线混合线路模型

架空线采用 PSCAD 中的 Transmission Lines 模型,该模型可详细模拟架空输电线路的杆塔、导线和地线的参数。采用频率相关模型搭建 GIL - 架空线混合线路中架空线路段的模型,架空线的几何参数根据实际参数进行设定。架空线路段的模型与 GIL 的模型相连,构成整体的混合线路模型。

500 kV GIL - 架空混合线路仿真模型如图 4 所示。其中,架空输电线路 1 段和 2 段的长度分别为 15 km 和 9.5 km,架空线为两个单回 500 kV 线路。终端站 1 侧电源电压为 500 kV,电源的正序阻抗为  $0.3032 + j4.9155 \Omega$ ,零序阻抗为  $0.3032 + j5.0439 \Omega$ ;终端站 2 侧电源电压为 500 kV,电源的正序阻抗为  $1.1301 + j7.3316 \Omega$ ,零序阻抗为  $1.1301 + j7.5246 \Omega$ 。中间的 GIL 区段的长度为 6 km,用于模拟两回 GIL,分别与两回架空线连接。

GIL - 架空混合线路改造前是与混合线路长度

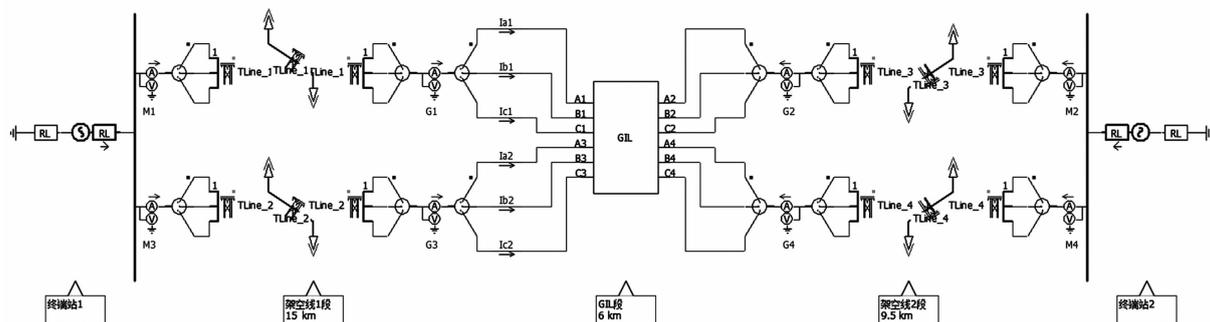


图 4 500 kV GIL - 架空线混合线路模型

相同的纯架空输电线路,杆塔结构和导线参数与 GIL - 架空混合线路中的架空线参数一致,采用频率相关模型搭建 GIL 改造前的均匀架空线输电线路模型。

## 3 GIL - 架空线混合线路故障特性仿真

GIL 的电气参数与架空线之间存在差异,改造前后线路相同位置发生故障时,故障相电压、电流会发生变化。

GIL - 架空混合线路的故障分析方法与纯架空线路基本相同,下面基于混合线路等效仿真模型,通过仿真总结提炼故障特性与纯架空线路的差异性。通过在不同线路位置施加单相接地故障、两相相间故障、两相接地故障和三相接地故障,分析终端站 1 母线处检测到的电压和电流变化。通过 GIL - 架空线混合线路和纯架空线路两种情况下仿真计算得到的故障相电压电流对比,得出二者故障特性的差异。

在混合线路模型中架空线 1 段上距离终端站 1 侧电源母线 7.5 km 和 15 km、GIL 中点和终点、架空线 2 段距终端站 2 4.5 km 等 5 处分别发生故障,如图 5 所示。设置在 0.30 s 时故障发生,故障持续时间为 3 个工频周期,0.36 s 故障切除。终端站 1 侧 PT、CT 测量故障后电压、电流波形。在所搭建的纯架空线输电线路模型中与混合线路相同的故障位置处发生故障,终端站 1 侧 PT、CT 测量故障后电压、电流波形,并和混合线路的故障电压、电流波形进行比较。图 6 至图 13 为距离终端站 1 侧电源母线 7.5 km 处发生不同类型故障时,在终端站 1 母线处监测到的混合线路系统与纯架空线路系统的故障相

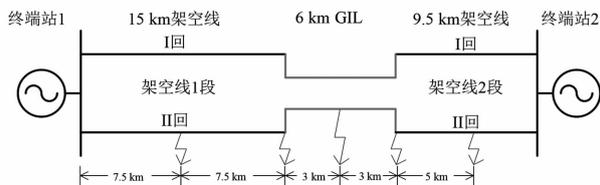


图 5 500 kV GIL - 架空线混合线路故障位置

发生 AB 相间故障时,故障相电压降低,电流增大。对比改造后混合线路和改造前纯架空线路的故障电压、电流可以看出改造前后故障相的电压、电流变化很小,故障相电压最大相差 0.58%,故障相电流最大相差 0.82%。

### 3) AB 相接地故障

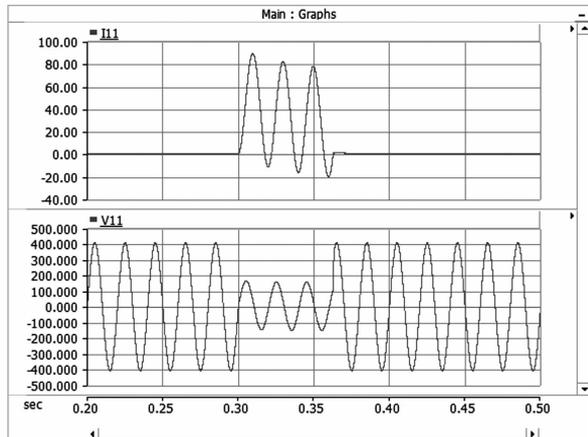


图 6 混合线路发生 A 相接地故障时故障相电压、电流

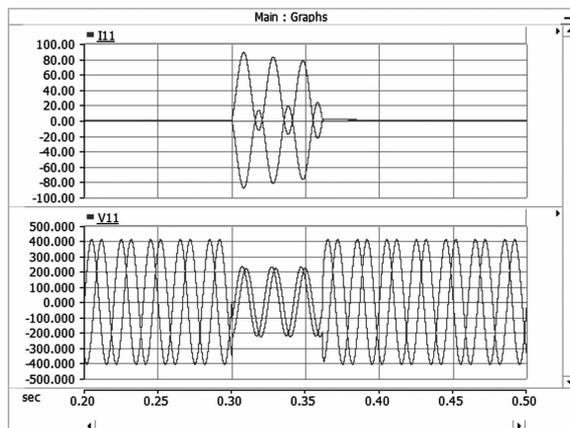


图 8 混合线路发生 AB 相相间短路故障时故障相电压、电流

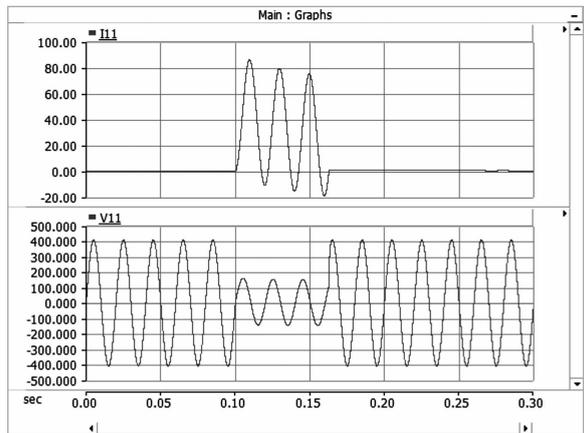


图 7 纯架空线路 A 相接地故障时故障相电压、电流电压电流波形。

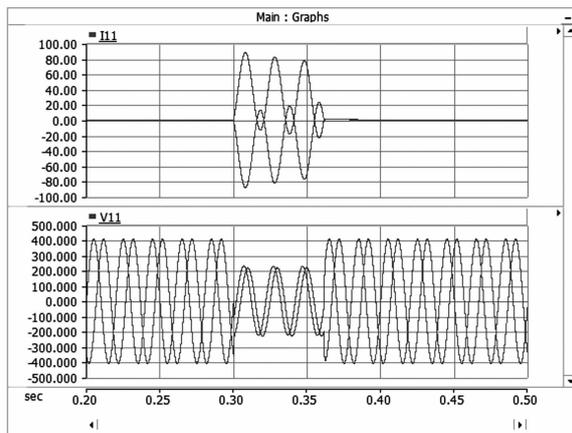


图 9 纯架空线路发生 AB 相相间短路故障时故障相电压、电流

#### 1) A 相接地故障

通过图 6 和图 7 对比,混合线路和纯架空线路架空线 1 段距离终端站 1 侧电源母线 7.5 km 处发生 A 相接地故障时,故障相电压降低,电流增大。对比改造后混合线路和改造前纯架空线路的故障电压、电流可以看出改造前后故障相的电压、电流变化很小,故障相电压最大相差 1.54%,故障相电流最大相差 2.94%。

#### 2) AB 相间故障

通过图 8 和图 9 对比可以看出,混合线路和均匀线路架空线 1 段距离终端站 1 侧电源母线 7.5 km 处

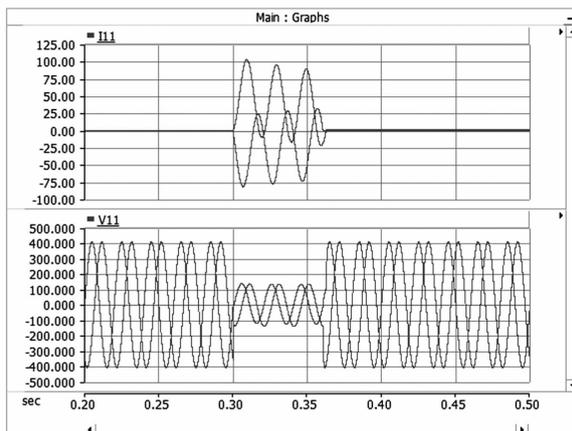


图 10 混合线路发生 AB 相相间短路故障时故障相电压、电流

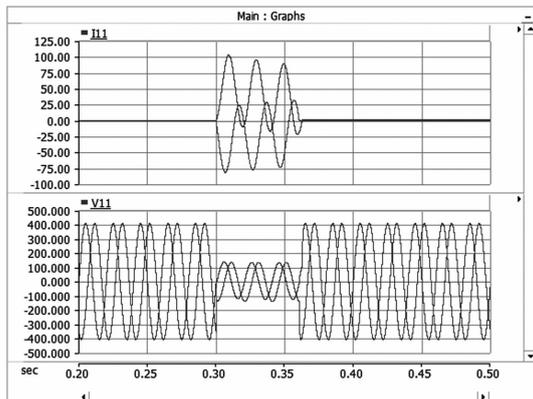


图 11 纯架空线路发生 AB 相接地故障时故障相电压、电流

通过图 10 和图 11 对比可以看出,混合线路和均匀线路架空线 1 段距离终端站 1 侧电源母线 7.5 km 处发生 AB 相接地故障时,故障相电压降低,电流增大。对比改造后混合线路和改造前均匀架空线路的故障电压、电流可以看出改造前后故障相的电压、电流变化很小,故障相电压最大相差 0.96%,故障相电流最大相差 0.79%。

#### 4) ABC 三相接地故障

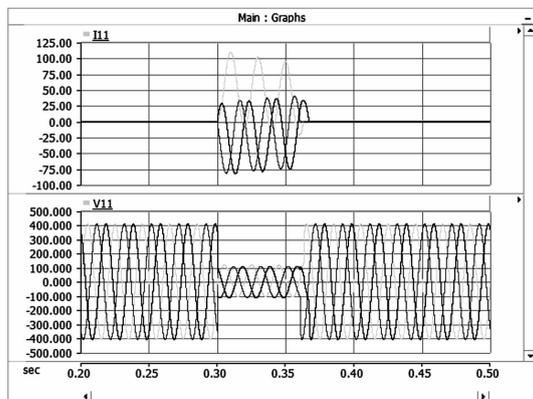


图 12 混合线路发生 ABC 三相接地故障时故障相电压、电流

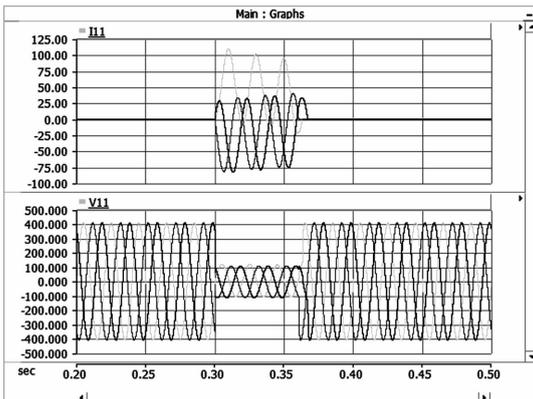


图 13 纯架空线路发生 ABC 三相接地故障时故障相电压、电流

通过图 12 和图 13 对比可以看出,混合线路和均匀线路架空线 1 段距离终端站 1 侧电源母线 7.5 km 处发生三相接地故障时电压降低,电流增大;对比改造后混合线路和改造前均匀架空线路的故障电压、电流可以看出改造前后故障相电压最大相差 0.85%,故障相电流最大相差 1.02%。

不同位置处发生故障时终端站 1 处母线监测到的故障相电压和电流的差异见表 1。

表 1 不同位置发生故障时混合线路和纯架空线路故障相电压电流差

故障位置	故障类型	电压差/%	电流差/%
距终端站 1 7.5 km	A 相接地	1.54	2.94
	AB 相短路	0.58	0.82
	AB 相接地	0.96	0.79
	ABC 三相接地	0.85	1.02
距终端站 1 15 km	A 相接地	3.50	5.19
	AB 相短路	0.28	2.81
	AB 相接地	2.19	2.31
	ABC 三相接地	0.96	2.56
距终端站 1 18 km	A 相接地	2.22	15.46
	AB 相接地	0.61	12.61
	ABC 三相接地	2.10	12.77
距终端站 1 21 km	A 相接地	8.67	20.88
	AB 相接地	4.05	20.70
	ABC 三相接地	4.08	20.79
距终端站 1 26 km	A 相接地	5.43	17.71
	AB 相短路	2.14	17.01
	AB 相接地	2.62	16.92
	ABC 三相接地	2.77	17.02

从表 1 的混合线路和纯架空线路的不同位置故障波形的仿真结果可以看出,当故障位于 GIL 区段左侧时,终端站 1 侧 PT、CT 测量混合线路模型和均匀线路模型在同一故障位置的故障电压、电流波形变化较小,电压最大相差 3.50%,电流最大相差 5.19%。这主要是因为故障位于 GIL 左侧时终端站 1 侧故障回路中不包含 GIL 区段,故障电压、电流波形变化不大。

当故障位于 GIL 区段内或右侧时,终端站 1 侧 PT、CT 测量混合线路模型和均匀线路模型在同一故障位置的故障电压、电流波形变化较大,电压最大相差 8.67%,电流最大相差 20.88%。这是因为故障

位于 GIL 区段内或右侧时终端站 1 侧故障回路中包含 GIL 区段,且 GIL 的电气参数与架空线之间存在较大差异,故 GIL 改造前后故障波形变化较大。

通过以上仿真结果可知,架空线路部分改造为 GIL 后,由于输电线路参数发生变化,故障相电压电流与改造前存在差异。线路改造后,当故障发生在 GIL 区段内或右侧时,终端站 1 监测到的故障相暂态电流最大可增大 20.88%,若改造后终端站 1 的进线断路器未更换,该电流可能会超过断路器的暂态电流开断能力,有必要对此进行校核,以确保混合线路发生短路故障时,断路器能可靠切断暂态故障电流。

## 4 结 语

针对某 500 kV 双回架空线路部分改造为 GIL 的输电线路工程,在 PSCAD 中建立了 GIL-架空线混合线路模型和改造前的纯架空线模型,在线路不同位置处设置短路故障,仿真计算了故障相电压和电流,并对线路改造前后的故障相电压、电流进行了对比分析,结论如下:

1) 当故障点位于 GIL 左侧时,同一故障位置的故障电压、电流波形变化较小,电压最大相差 3.50%,电流最大相差 5.19%;

2) 当故障点位于 GIL 中或右侧时,同一故障位置的故障电压、电流波形变化较大,电压最大相差 8.67%,电流最大相差 20.88%。

3) 由于架空线部分进行 GIL 改造后,输电线路的参数发生了变化,故障后终端站 1 母线处监测到的暂态故障电流最大可增大 20.88%,该电流可能会超过终端站 1 进线断路器的暂态电流开断能力,有必要对此进行校核,以确保混合线路发生短路故障时,断路器能可靠切断暂态故障电流,保障设备安全。

### 参考文献

[1] Benato R, Di-Mario C, Koch H. High-capability Applications of Long Gas-insulated Lines in Structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):

619-626.

- [2] 尚涛,李果. 气体绝缘输电线路的特点及其应用[J]. 南方电网技术,2011,5(1):81-84.
- [3] 王通德,王晓琪,万方华,等. 高压交流 GIL 的设计与应用[J]. 高压电器,2014,50(10):107-111.
- [4] 周辉,张卫华.  $N_2/SF_6$  混合气体的绝缘特性[J]. 高压电器,2003,39(5):13-15.
- [5] Christophorou L G, Brunt R J.  $SF_6/N_2$  Mixtures, Basic and HV Insulation Properties [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5):952-1002.
- [6] 齐波,张贵新,李成榕,等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术,2015,41(5):1466-1473.
- [7] 刘兆林. 500 kV 气体绝缘金属封闭输电线路在华东电网的应用[J]. 华东电力,2005(12):81-83.
- [8] Koch H. Gas Insulated Transmission Lines (GIL) [M]. Chichester, United Kingdom: Wiley-IEEE Press, 2012: 33-38.
- [9] 范建斌. 气体绝缘金属封闭输电线路及其应用[J]. 中国电力,2008,41(8):38-43.
- [10] 高凯,李莉华. 气体绝缘输电线路技术及其应用[J]. 中国电力,2007,40(1):84-88.
- [11] Piatek Z, Kusiak D, Szczepielniak T. Electromagnetic Field and Impedance of High Current Busducts [C]. In Proceedings of the 2010 Proceedings of the International Symposium, Wroclaw, Poland, 2010: 20-22.
- [12] Piatek Z. Self and Mutual Impedance of A Finite Length Gas-insulated Transmission Line (GIL) [J]. Electric Power System Research, 2007, 77: 191-203.
- [13] Piatek Z. Impedance of Finite-length Isolated Phase Busducts [J]. Acta Technica CSAV, 2008, 53(4): 393-431.
- [14] Goll F, Witzmann R, Neumann C, et al. Modeling Techniques for Lightning Overvoltage Analysis Using the Example of Gas Insulated Transmission Lines (GIL) [C]. In Proceeding of the IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical System (IEEE CATCON), Kolkata, India, 2013:6-8.

### 作者简介:

李浩原(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为柔性直流输电、换流站绝缘配合。

(收稿日期:2020-12-06)